

# 多效太阳能膜蒸发净水器的研发与性能研究

东南大学能源与环境学院 ■ 陈浩 丁业焯 金扬皓 秦晓彤 吴笛 苏中元\*

**摘要:** 介绍了一种高效利用太阳能净化苦咸水的装置, 该装置利用全玻璃太阳能真空集热管集热, 并为每一根集热管配备聚光器, 同时减少了集热管的数量, 不仅提高了传热工质水的温度, 增加了集热管对太阳辐射的吸收效率, 而且降低了装置的成本, 更利于装置实现净化苦咸水的功能。该装置二次利用蒸汽的余热, 有效提高了能量的利用效率; 并只以太阳能为唯一能源, 制造简单、成本低廉; 为解决我国西北偏远地区苦咸水无法直接饮用的问题提供了有效途径。

**关键词:** 多效; 太阳能; 苦咸水净化; 膜蒸发; 净水器

## 0 引言

我国幅员辽阔, 有着十分丰富的太阳能资源。据估算, 我国陆地表面平均每年接收的辐射量为  $5000 \text{ MJ/m}^2$ , 其中, 年日照时数超过  $2000 \text{ h}$  的地区面积较大, 占全国总面积的  $2/3$  以上, 具有利用太阳能的良好条件<sup>[1]</sup>。据资料显示, 我国每年接收到的太阳辐射总量相当于  $2.4 \times 10^4$  亿吨标准煤的储量<sup>[2-3]</sup>。

没有水, 就没有生命。水在人类社会的发展中扮演了不可或缺的角色, 尤其是淡水, 更是在工业、农业及日常生活中具有不可替代的作用<sup>[4]</sup>。然而地球上只有  $3\%$  的水是淡水, 另外  $97\%$  都是由于含盐量太高而无法直接饮用的海水<sup>[5]</sup>。如果淡水资源短缺的问题不能得到有效解决, 将会阻碍人类社会的发展进步。

海水淡化是解决人类淡水资源短缺的重要途径, 而苦咸水淡化作为其中非常重要的一种技术,

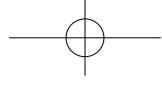
在世界多个国家掀起了研究热潮<sup>[6]</sup>。据资料显示, 目前已有超过  $7500$  万人正通过海水淡化技术来获取所需的淡水, 已有超过  $1.3$  万座海水淡化工厂在全球各个地区建成, 并以每年  $15\%$  的速度迅速发展<sup>[7]</sup>。

虽然海水淡化技术有很多种, 包括多级闪蒸 (MSF)、多效蒸馏 (MED) 和反渗透 (RO) 法等, 但这些技术都仅适用于大规模生产<sup>[8]</sup>。亟需针对日照充足的偏远地区或海岛地区, 研发一种小规模、低成本、安装和使用简单且效率较高的太阳能净水装置。

为此, 本文设计了一种多效太阳能膜蒸发净水器装置 (下文简称为“净水装置”), 其以太阳能作为唯一能量来源, 利用太阳能产生的热能作为驱动源, 避免了由热能转化为电能再进行利用造成的能量损耗, 能够有效地利用太阳能净化苦咸水等不干净的水源, 具有高效、耐用、物美价

收稿日期: 2019-07-02

通信作者: 苏中元 (1975—), 男, 博士、副教授, 主要从事太阳能热利用方面的研究。szyme@163.com



廉的特点。

## 1 净水装置的结构及其工作原理

### 1.1 设计原理

净水装置是将太阳能转化为工质的内能，再转变为苦咸水内能，将苦咸水加热蒸发再收集，将其净化到饮用水的标准。集热管将收集的太阳能加热工程联箱（以下简称为“联箱”）内的工质，再将热量传导到联箱外壁水膜，水膜将储水箱过滤后的水进行蒸发，蒸发后的净水流入净水箱，完成最后的收集工作。因此，净水装置主要由集热部分、传热部分、收集储存部分这3大功能部分及支撑部分组成。

### 1.2 集热装置

传统的太阳能热水器集热装置主要为图1所示的竖单排真空管型太阳能集热器，集热器利用热虹吸现象将集热管中的热量通过传热工质传递给联集管，这是20世纪80年代由清华大学的殷志强教授和悉尼大学的Harding博士一起研制成的<sup>[9-10]</sup>；相比于平板型集热器，这种装置的优点是制造简单、成本低廉，因此得到大规模的推广应用。

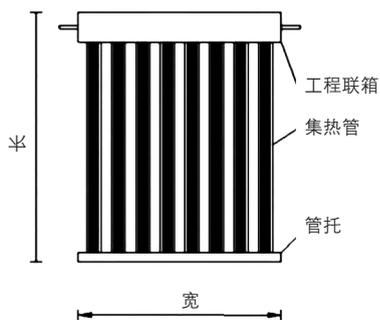


图1 竖单排真空管型太阳能集热器

由于集热管是圆形的，所以无论光线从哪个角度入射，集热管都能够正常工作。但在实际工作时，集热管一半朝光，另一半背光，同时由于太阳的运动，其入射线光并不总是在集热管所在平面的法线，因此集热管只有一部分能够吸收到太阳辐射<sup>[11]</sup>；而且相邻集热管之间存在间隙，因此集热管所在平面上的太阳辐射并不能被完全

吸收，如图2所示，在BC之间的太阳辐射无法被吸收。综合来看，直接使用竖单排真空管型太阳能集热器集热存在很多不足，需要进行改进。

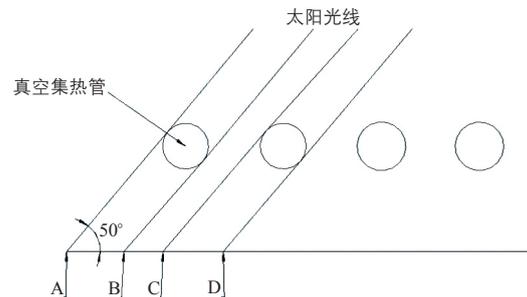


图2 集热管直接吸收太阳辐射

与太阳能热水器不同的是，本文介绍的净水装置需要更高的温度，但不需要太多的传热工质。因此，将聚光技术与热管式真空管相结合，设计了如图3所示的集热装置。

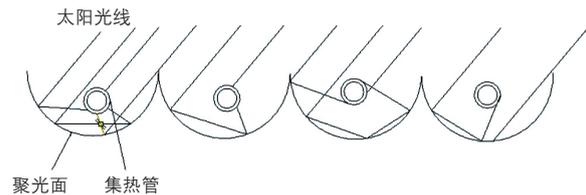


图3 净水装置的集热装置示意图

在集热装置面积不变的情况下，将集热器原来的12根集热管改为4根，并为每一根集热管配备了1个聚光器，这样不仅提高了太阳辐射的吸收率，还降低了成本。

集热装置所占面积为 $1.15 \text{ m}^2$ ，尽管为每一根集热管都配备了聚光器，但集热管并不能吸收所有面积上的太阳辐射。假设平均太阳辐射为 $800 \text{ W/m}^2$ ，集热管的太阳吸收比为0.9，经过试验，集热管只能获得其中80%的太阳辐射，因此，每小时集热装置能够吸收的能量 $W=800 \times 1.15 \times 0.9 \times 0.8 \times 3600=2384.64 \text{ kJ}$ 。

集热装置以水作为传热工质，比热容 $C$ 为 $4200 \text{ J/(kg} \cdot \text{°C)}$ ；集热管的长度 $l$ 为 $1 \text{ m}$ ，外管直径 $\phi$ 为 $47 \text{ mm}$ ，除两层玻璃之间不能装水的部分外，每根集热管可盛水 $0.95 \text{ L}$ ，再加上联箱里盛放的水，共含有 $15 \text{ L}$ 的水。假设环境温度为 $20 \text{ °C}$ ，那么将装置中的水加热到 $80 \text{ °C}$ 需要 $1.58 \text{ h}$ 。

### 1.3 传热部分

传热部分主要由联箱、吸水面料(水膜)、隔板组成。联箱内的工质为主要热量来源,联箱将吸附在联箱外壁吸水面料上的水蒸发;水蒸气在隔板处凝结,凝结产生的热量传递至隔板外,将吸水面料处的水再次蒸发;最后使水凝结在储水箱外壁,凝结产生的热量为储水箱内的苦咸水预热。4个阶段的传热过程使整个蒸发过程中的热量可以被多次高效利用。

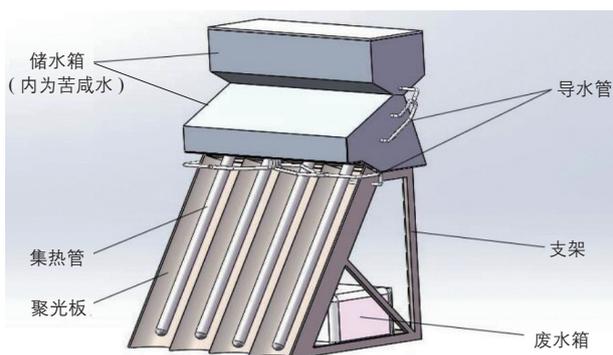


图4 净水装置正面图

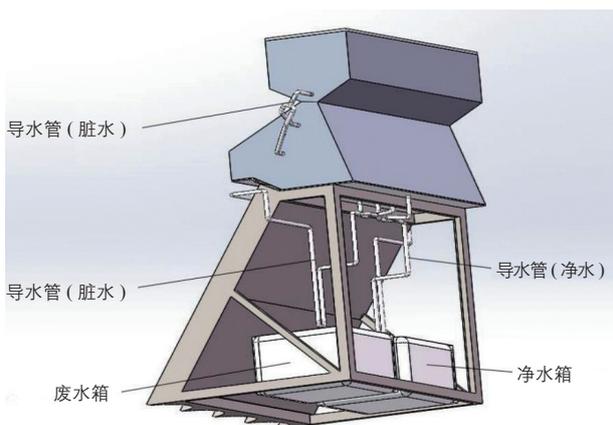


图5 净水装置背面图

联箱内平均每天能提供6 h 80℃的热源,所要净化的苦咸水的温度为20℃;铝制箱体壁面的导热系数 $k_1$ 为230 W/(m·K)。

净水装置的蒸发面和冷凝壁面的温度不平衡,且由于水蒸气在空间中的运动,因此装置内不仅存在导热、对流和辐射传热,还存在较为复杂的相变传热。

净水装置的蒸发冷凝发生在3个地方,且共有4种能量参与其中,分别为:联箱内工质能量、

联箱外表面上的能量、内层换热面上的苦咸水能量,以及外层换热面上的苦咸水能量,下文将对这4种能量进行分析。

#### 1.3.1 联箱内工质能量分析

联箱内工质水的能量全部来自于集热管,根据能量守恒原理可知:

$$Cm_0 \frac{dT_0}{dt} = I(t)A_c \eta_s - q_{\text{los},0} - q_{\text{c},1} \quad (1)$$

式中, $I(t)$ 为 $t$ 时刻当地的太阳辐射量, W/m<sup>2</sup>;  $A_c$ 为集热器面积, m<sup>2</sup>;  $\eta_s$ 为集热器热效率, %;  $m_0$ 为集热器内水的质量, kg;  $q_{\text{c},1}$ 为联箱与外表面水膜之间的对流换热量, W;  $T_0$ 为集热系统内水的平均温度, °C;  $q_{\text{los},0}$ 为集热系统内的水与环境之间的散热;  $dt$ 为时间的微分。

$q_{\text{los},0}$ 可表示为:

$$q_{\text{los},0} = U_b(T_0 - T_a)A_h \quad (2)$$

式中, $U_b$ 为热损系数, W/(°C·m<sup>2</sup>);  $T_a$ 为环境温度, °C;  $A_h$ 为集热系统外表面的表面积, m<sup>2</sup>。

#### 1.3.2 联箱外表面上的能量分析

根据能量守恒定律,联箱外表面流过的苦咸水能量可表示为:

$$q_{\text{c},1} = \frac{(q'd_{m1} + Cd_{m1}\Delta T_1)}{dt} \quad (3)$$

式中, $q'$ 为水的汽化潜热, J/kg;  $\Delta T_1$ 为水从初始状态加热到蒸发状态的温度差, °C;  $d_{m1}$ 为联箱外表面上 $dt$ 时间内蒸发的水量, kg。

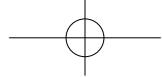
该换热面上覆有吸水面料,其会对表面换热系数产生影响,平均影响系数为 $k$ ,则 $q_{\text{c},1}$ 可表示为:

$$q_{\text{c},1} = kh_1 A_1 (T_0 - T_h) \quad (4)$$

式中, $h_1$ 为联箱外表面上的对流换热系数, W/(°C·m<sup>2</sup>);  $A_1$ 为联箱外表面的表面积, m<sup>2</sup>;  $T_h$ 为联箱外表面流过的苦咸水的温度, °C。

#### 1.3.3 内层换热面上的苦咸水能量分析

该换热面上覆有吸水面料。联箱外表面上产生的蒸汽在此处冷却凝结,而外部水冷壁上的苦咸水吸热蒸发,同时该换热面接收来自联箱外表



面的辐射传热，并与外层换热面进行辐射传热。

根据能量守恒定律，内层换热面上的苦咸水能量可表示为：

$$\frac{(q'd_{m2}+Cd_{m2}\Delta T_2)}{dt}=q_{m1}+q_r \quad (5)$$

式中， $d_{m2}$  为内层换热面外部水冷壁上在  $dt$  时间内蒸发的水量， $kg$ ； $q_{m1}$  为蒸汽在内表面上进行冷却凝结过程中的换热量， $W$ ； $q_r$  为辐射换热量， $W$ ； $\Delta T_2$  为内层换热面外部水冷壁上在  $dt$  时间内蒸发水量温度的上升值， $^{\circ}C$ 。

$q_{m1}$  可表示为：

$$q_{m1}=q'd_{m1}+Cd_{m1}\Delta T_1' \quad (6)$$

式中， $\Delta T_1'$  为水从气态变到液态的温度差， $^{\circ}C$ 。

$q_r$  可表示为：

$$q_r=q_{r,2}-q_{r,3} \quad (7)$$

式中， $q_{r,2}$  为接收来自联箱外表面的辐射传热量， $W$ ； $q_{r,3}$  为传递给外层换热面的辐射传热量， $W$ 。

$q_{r,2}$  可表示为：

$$q_{r,2}=h_{r,2}A_2(T_{10}^4-T_{20}^4) \quad (8)$$

式中， $A_2$  为内层换热面的表面积， $m^2$ ； $h_{r,2}$  为联箱外表面到内层换热面的辐射换热系数， $W/(m^2\cdot K^4)$ ； $T_{10}$  为联箱外表面的温度， $^{\circ}C$ ； $T_{20}$  为内层换热面的温度， $^{\circ}C$ 。

$q_{r,3}$  可表示为：

$$q_{r,3}=h_{r,3}A_3(T_{20}^4-T_{30}^4) \quad (9)$$

式中， $A_3$  为外层换热面的表面积， $m^2$ ； $h_{r,3}$  为内层换热面到外层换热面的辐射换热系数， $W/(m^2\cdot K^4)$ ； $T_{30}$  为外层换热面上的温度， $^{\circ}C$ 。

### 1.3.4 外层换热面上的苦咸水能量分析

内层换热面上产生的水蒸气，在外层换热面上遇到水冷壁，水冷壁上温度低的苦咸水使内层换热面上产生的水蒸气冷却、凝结，储水箱中的苦咸水则吸收热量，升温流入内层换热面与联箱外表面。此过程用公式可表示为：

$$q'm_2+Cm_2\Delta T_3+Q_{r,3}=Q \quad (10)$$

式中， $m_2$  为在外层换热面上进行换热的水蒸气质量， $kg$ ； $Q_{r,3}$  为内层换热面与外层换热面

之间的辐射热交换量， $J$ ； $\Delta T_3$  为在外层换热面上进行换热的水蒸气从气态变化到液态的温度差， $^{\circ}C$ ； $Q$  为储水箱内的苦咸水所吸收的热量， $J$ 。

### 1.4 收集储存

收集储存部分包括储水箱、废水箱、净水箱和相应的导水管道。其中，储水箱同时起到初步过滤和冷凝壁的作用，所以其要架设于隔板之上。考虑到支架承重，以及水的凝结效果、过滤效果等因素，最终决定蒸发冷却装置采用图6所示结构。

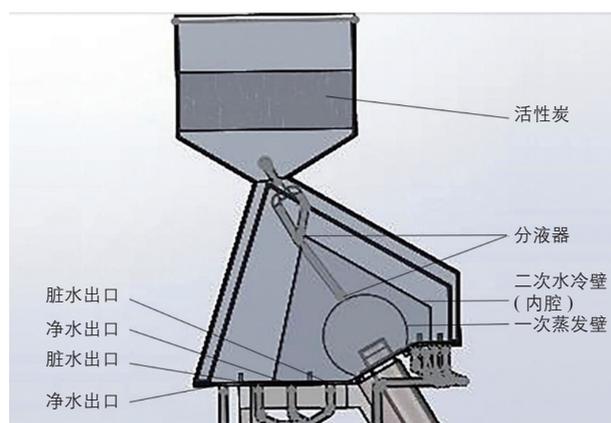


图6 蒸发冷却装置结构图

储水箱分为上下两层，上层作为过滤部分，内置活性炭、砂石等物，下层为水冷壁，用导管与下层相接，将过滤后的水导到吸水面料处进行蒸发。净水箱与废水箱与托板相连，分别负责收集蒸发后的干净水与未蒸发完成的废水。

支撑部分包括托板与支架。支架由不锈钢制成，负责总体支撑；托板由塑料制成，负责支撑隔板及储水箱，同时，托板也具有收集作用，凝结水与废水顺壁面流到托板处，通过隔层分开，最终顺着管道流入各个水箱内。

## 2 苦咸水的净化实验及研究

### 2.1 苦咸水组分

实验所用水是根据崇明岛苦咸水成分模拟所得，与 GB 5749-2006《生活饮用水卫生标准》中饮用水标准相比，其所含溶解性固体、铁、氯化物、硫酸盐及其浊度、硬度都严重超标<sup>[12]</sup>。

由于崇明岛苦咸水的总溶解固体 (TDS) 较高, 且具有多重污染、随季节变化快的特点, 实验用水仅部分模拟低咸期时崇明岛的苦咸水成分, 具体组分情况如表 1 所示。

表 1 苦咸水组分

项目	实验所用水的测量值	国标值
浊度 /NTU	5	1
总硬度 (以 $\text{CaCO}_3$ 计) / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1500	450
铁 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.8	0.3
氯化物 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	5250	250
硫酸盐 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3500	250

## 2.2 工艺流程

实验中, 初步净化所用的活性炭为颗粒活性炭层, 用于初步吸附苦咸水中的大颗粒及不溶性物质。实验所采用的吸水面料为 coolmax 纤维针织面料, 相比于纯棉面料或普通化纤面料, 其四沟槽纤维结构具备良好的吸水及扩散能力, 可迅速吸收水分并传导至外层纤维, 形成水膜。

苦咸水由重力作用经活性炭层初步吸附净化后, 流入储水箱中储存; 当集热器开始工作, 储水箱中的苦咸水经虹吸管大部分虹吸至内层吸水面料, 在吸水面料表层形成水膜; 水膜受热蒸发后 (蒸发温度为  $45\sim 72\text{ }^\circ\text{C}$ ), 在内腔体内侧遇冷凝结 (冷却温度为  $30\text{ }^\circ\text{C}$ ), 再由重力作用经管道流入净水箱; 储水箱中的苦咸水少部分经虹吸管虹吸至内腔体外侧的外层吸水面料, 利用内层的蒸发余热使面料表层水膜蒸发, 在外腔体内侧遇冷凝结, 流入净水箱。

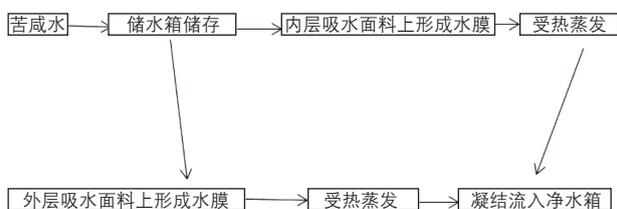


图 9 净水装置工艺流程图

## 2.3 模拟实验结果

为了测试吸水面料的性能与所得净水的

质, 在实验室利用已有的器材搭建了简单的平台进行模拟实验。

模拟实验中, 550 ml 苦咸水 (室温  $24\text{ }^\circ\text{C}$ ), 在  $0.12\text{ m}^2$  的吸水面料表面, 经 40 s 基本完全蒸发。也就是说, 充足热源的情况下, 苦咸水的平均蒸发速率约为  $114.58\text{ mL}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ 。蒸汽遇冷凝结后, 共收集到淡水 370 mL。

收集到的淡化水经 TDS 水质检测笔检测, 其 TDS 值在 GB 5749-2006《生活饮用水卫生标准》中规定的 1000 mg/L 这一限值以内。

## 3 净水装置的性能分析

### 3.1 净水装置的实验结果

为了测量净水装置的性能, 根据设计图纸搭建了实验平台, 分别在 9 月 23-24、10 月 2-3 日、10 月 12 日、10 月 19-20 日这 7 天进行了测试。

表 2 实验当天的太阳辐射量、苦咸水量与净水量

实验日期	最大太阳辐射量 / $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	苦咸水量 /L	净水量 /L
09-23	1089.3	34.53	28.01
09-24	924.6	28.35	22.77
10-02	823.4	26.38	20.18
10-03	976.8	30.74	24.35
10-12	1067.6	33.29	27.56
10-19	997.5	29.89	23.46
10-20	759.4	26.76	20.96

### 3.2 净水装置的性能计算

该净水装置的性能系数  $\eta_{\text{pr}}$  的计算式为:

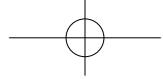
$$\eta_{\text{pr}} = \frac{\sum M \times \Delta T}{\int_{8.00}^{6.00} [I(t) \times A_c \times 3600] dt} \quad (11)$$

式中,  $M$  为净水箱内收集的净水量, kg;  $\Delta T$  为苦咸水从进入蒸发面到离开装置过程中的温度差,  $^\circ\text{C}$ 。

将表 2 中 7 天的实验数值代入式 (11), 可得  $\eta_{\text{pr}}=0.75$ 。

水的净化率  $\eta_{\text{w}}$  可表示为:

$$\eta_{\text{w}} = \frac{M}{M_1} \quad (12)$$



式中,  $M_1$  为苦咸水量, L。

根据相关数据可计算得到, 水的净化率  $\eta_w=79.54\%$ 。

### 3.3 净水装置的经济性分析

按实验搭建  $1\text{ m}^2$  的净水装置计算投资成本; 集热管的成本为  $4 \times 20=80$  元, 支架成本为 100 元, 聚光槽为 60 元, 吸水面料为 40 元, 过滤材料为 50 元, 水箱为 150 元, 管路为 40 元, 总计为 520 元。当多台净水装置共同使用时可采用共用水箱、过滤装置等, 以降低投资成本。

吸水面料 1 年更换一次, 产水成本为 5 元/t, 接近大型反渗透法净化苦咸水成本, 但该装置初始投资低, 建设周期短, 维护简单。因此本装置具有较高的实用价值与良好的经济性。

## 4 结论

本文对现有的真空集热管使用方式进行了改进, 设计制造了一种多效太阳能膜蒸发净水器装置, 以太阳能作为唯一能量来源, 利用膜蒸发的方式达到净化苦咸水的目的, 降低了成本, 并增加了太阳辐射的吸收效率。该装置采用双层净化的方式, 使用第一次蒸发出的水蒸气的余热给第二层的苦咸水水膜加热, 同时第二层的苦咸水水膜起到水冷壁的作用, 大幅提高了装置的能源利用率; 并采用了具有特殊结构的吸收材料, 可以将脏水扩散在最外面, 有效提高了苦咸水的蒸发

(接第 32 页)

comprehensive characterisation of screen-printed mc-Si Metal Wrap Through (MWT) solar cells[A]. 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference[C]. Milano, 2007.

[69] Clement F, Menkoe M, Erath D, et al. High throughput via-metallization technique for multi-crystalline metal wrap through (MWT) silicon solar cells exceeding 16% efficiency[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2010, 94: 51 - 56.

[70] Guillemin N, Heurtault B J B, Geerligs L J, et al. Development towards 20% efficient Si MWT solar cells for low-cost industrial production[J]. Energy Procedia, 2011, 8: 9 - 16.

[71] Inomata Y, Fukui K, Shirasawa K. Surface texturing of large area multicrystalline silicon solar cells using reactive ion

速率。

通过实验可以看出, 该装置完美实现了净化目标, 且净水能力很强, 完全可满足人们日常饮水的需求。

### 参考文献

[1] Zhang X L, Wang R H, Huo M L, et al. A study of the role played by renewable energies in China's sustainable energy supply[J]. Energy, 2010, 35(11): 4392 - 4399.

[2] 吕勇军, 鞠振河. 太阳能应用检测与控制技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.

[3] 常泽辉, 于苗苗, 郑子行, 等. 横管式太阳能苦咸水淡化装置产水性能研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(2): 505 - 510.

[4] 郭晓龄, 黄肖容, 邓尧. 海水淡化技术现状及展望[J]. 当代化工, 2012, (9): 964 - 966.

[5] 刘昌明, 陈志凯. 中国水资源现状评价和供需发展趋势分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.

[6] 李明春. 板式海水淡化传热传质特性模拟及试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

[7] 贾柠泽, 侯静, 常泽辉, 等. 多效管式太阳能苦咸水淡化装置热质传递强化研究[J]. 可再生能源, 2017, 35(7): 978 - 983.

[8] 于苗苗. 聚光管式太阳能苦咸水淡化系统性能研究[D]. 内蒙古: 内蒙古工业大学, 2017.

[9] Yin Z, Harding G L. "Water-in-glass" manifolds for heat extraction from evacuate solar collector tubes[J]. Solar Energy, 1984, 32(2): 223 - 230.

[10] Harding G L, Yin Z, Mackey D. Heat extraction efficiency of a concentric glass tubular evacuated collector[J]. Solar Energy, 1985, 35(1): 71 - 80.

[11] 叶鸿烈, 杨军伟, 王飞, 等. 聚光直热式加湿除湿型太阳能海水淡化装置性能测试与经济性分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(2): 505 - 512.

[12] 赖特明, 方建慧, 邓英, 等. 纳滤膜处理崇明岛苦咸水中试研究[J]. 盐业与化工, 2009, 38(2): 17 - 20. 太阳能

etching method[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1997, 48: 237 - 242.

[72] Yoo J, Yu G, Yi J. Large-area multicrystalline silicon solar cell fabrication using reactive ion etching (RIE)[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95: 2 - 6.

[73] Kumaai A. Texturization using metal catalyst wet chemical etching for multicrystalline diamond wire sawn wafer[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015, 133: 216 - 222.

[74] Cao F, Chen K, Zhang J, et al. Next-generation multicrystalline silicon solar cells: Diamond-wire sawing, nano-texture and high efficiency[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015, 141: 132 - 138. 太阳能